

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
6. November 2003 (06.11.2003)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 03/091660 A1(51) Internationale Patentklassifikation⁷: G01B 11/25

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP03/04210

(22) Internationales Anmeldedatum:
23. April 2003 (23.04.2003)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
102 19 054.2 24. April 2002 (24.04.2002) DE(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT
ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN
FORSCHUNG E.V. [DE/DE]; Leonrodstrasse 54,
80636 München (DE).

(72) Erfinder; und

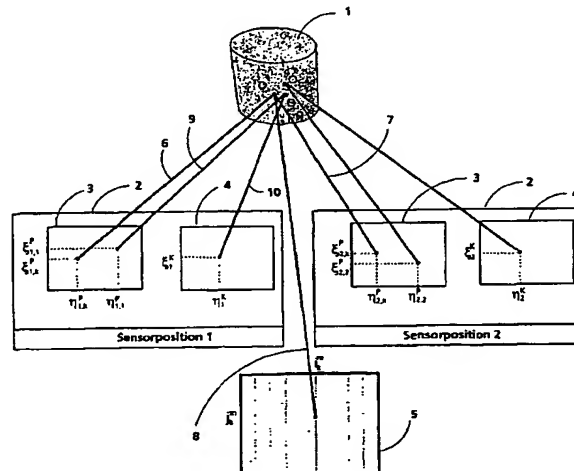
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): NOTNI, Gunther

[DE/DE]; Franz-Kugler-Strasse 14, 07749 Jena (DE).
HEINZE, Mathias [DE/DE]; Friedrich-Engels-Strasse
26, 07749 Jena (DE). KÜHMSTEDT, Peter [DE/DE];
Ernst-Bloch-Ring 27, 07747 Jena (DE).(74) Anwalt: PFENNING MEINIG & PARTNER GBR;
Joachimstaler Strasse 10-12, 10719 Berlin (DE).

(81) Bestimmungsstaat (national): US.

(84) Bestimmungsstaaten (regional): europäisches Patent (AT,
BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR,
HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR).Veröffentlicht:
— mit internationalem RecherchenberichtZur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Ab-
kürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Co-
des and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der
PCT-Gazette verwiesen.

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR DETERMINING THE SPATIAL CO-ORDINATES OF AN OBJECT

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR BESTIMMUNG DER RÄUMLICHEN KOORDINATEN EINES
GEGENSTANDES

(57) Abstract: The invention relates to a method for determining the spatial co-ordinates of an object, whereby the object is illuminated with patterns of light from at least two directions by means of a projection device. A calibrating camera and at least one measuring camera at least partially record the patterns of light projected onto the object, the calibrating camera being fixed in relation to the object. The projection device is calibrated by means of at least four phase measuring values, the measuring camera is calibrated using at least two phase measuring values, and the three-dimensional co-ordinates of the object are calculated using at least one phase measuring value. The projection device and the measuring camera are thus transferred together into the desired positions.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 03/091660 A1



(57) Zusammenfassung: Es wird ein Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Koordinaten eines Gegenstandes vorgeschlagen, bei dem der Gegenstand mit einer Projektionsvorrichtung aus mindestens zwei Richtungen mit Lichtmustern beleuchtet wird. Eine Kalibrierkamera und mindestens eine Messkamera zeichnen die projizierten Lichtmuster auf den Gegenstand zumindest teilweise auf, wobei die Kalibrierkamera in Bezug auf den Gegenstand ortsfest ist. Mittels mindestens vier Phasenmesswerte wird die Kalibrierung der Projektionsvorrichtung vorgenommen, anschliessend wird unter Verwendung von mindestens zwei Phasenmesswerten die Messkamera kalibriert und schliesslich werden unter Verwendung von mindestens einem Phasenmesswert die dreidimensionalen Koordinaten des Gegenstandes berechnet. Die Projektionsvorrichtung und die Messkamera werden dabei zusammen in die gewünschten Positionen umgesetzt.

VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR BESTIMMUNG DER RÄUMLICHEN KOORDINATEN EINES
GEGENSTANDES

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung
5 der räumlichen Koordinaten eines Gegenstandes nach
dem Oberbegriff des Hauptanspruchs sowie eine Vor-
richtung zur Durchführung des Verfahrens.

10 Zur berührungslosen flächenhaften Erfassung von Ober-
flächenformen, Oberflächengeometrien oder Koordinaten
ausgewählter Punkte werden verschiedene optische
Prinzipien eingesetzt. Allen Verfahren ist dabei ge-
meinsam, daß die Bestimmung der 3-D-Koordinaten eines
15 Oberflächenmeßpunktes nur dann möglich ist, wenn min-
destens drei unabhängige Meßwerte für diesen Punkt
vorliegen. Zusätzlich gehen Annahmen über die Geome-
trie des Meßsystems in das Ergebnis ein.

20 Ein Verfahren ist die klassische Streifenprojektions-
technik, die mit einer oder mehreren CCD-Kameras und

einem Projektor realisiert wird. (DE 41 20 115 C2, DE 41 15 445 A1. In derartigen Vorrichtungen werden die Gitterlinien oder Gray-Code-Sequenzen auf die zu vermessende Oberfläche projiziert. Eine CCD-Kamera registriert an jedem ihrer Empfängererelemente die Intensität eines Bildpunktes auf der Oberfläche. Mit bekannten mathematischen Algorithmen werden aus den Intensitätsmeßwerten Phasenmeßwerte berechnet. Die gesuchten Objektkoordinaten können nachfolgend aus den Phasenmeßwerten und den Bildkoordinaten der Meßpunkte in der Bildebene des Aufnahmesystems berechnet werden. Voraussetzung dafür ist allerdings die Kenntnis der Geometrie des Meßsystems (Orientierungsparameter von Projektor und Kamera) sowie der Abbildungseigenschaften der Projektions- und Abbildungsoptik.

Die Anzahl der zu bestimmenden Orientierungsparameter läßt sich erheblich einschränken, wenn ausschließlich die Phasenmeßwerte zur Koordinatenberechnung verwendet werden. In solchen Systemen bestimmt die Lage eines einzelnen Empfängererelementes im Aufnahmesystem ausschließlich den Meßort, wird aber als Meßinformation nicht ausgewertet. Durch Beleuchtung der Szene aus mehreren, aber mindestens drei Projektionsrichtungen mit Gitterlinien oder auch Gray-Code-Sequenzen und Beobachtung mit einer oder mehreren in Bezug zum Objekt fest positionierten Kameras, lassen sich beispielsweise Koordinaten bei bekannter Geometrie des Beleuchtungssystems berechnen. In allen diesen Systemen müssen die Systemparameter (Orientierungsparameter) separat erfaßt werden, wobei dies typischerweise durch eine sogenannte Vorabkalibrierung des Systems geschieht. Dabei werden Kalibrierkörper mit bekannter Geometrie vermessen, mit Hilfe derer die Geometrieparameter des Meßaufbaus modelliert werden (DE 195 36 297 A1). Unbrauchbar ist diese Vorgehensweise immer

dann, wenn Geometrieparameter in weiteren Messungen nicht konstant gehalten werden können, beispielsweise durch Temperatureinflüsse oder in Folge mechanischer Beanspruchung des Systems oder wenn bedingt durch die Komplexität der Meßaufgabe eine variable Sensoranordnung gefordert wird und daher eine Vermessung mit vorab festgelegter Anordnung nicht in Frage kommt.

Photogrammetrische Meßverfahren überwinden die Schwierigkeit einer separaten Einmeßprozedur. Als Meßinformationen dienen hier die Bildkoordinaten, also die Lage der Meßpunkte im Raster des Aufnahmesystems. Aus mindestens zwei unterschiedlichen Kamerapositionen müssen für einen Objektpunkt die Bildkoordinaten bekannt sein. Vorteilhaft bei diesen Messverfahren ist dabei, daß pro Meßpunkt ein überzähliger Meßwert gewonnen werden kann, d.h. bei zwei Kamerapositionen liegt ein Meßwert mehr vor, als für die Berechnung der drei Koordinaten eines Punktes erforderlich ist. Auf diese Weise ist es bei hinreichend vielen Meßpunkten möglich, simultan Koordinaten, innere und äußere Orientierungsparameter der Kameras sowie Korrekturparameter für die Verzeichnung zu berechnen. Schwierigkeiten ergeben sich jedoch bei dem Auffinden der dazu notwendigen homologen Punkten, vor allem für sehr viele Meßpunkte. Hierzu müssen in aufwendigen Bildverarbeitungsprozeduren Texturen oder Oberflächenstrukturierungen aus verschiedenen Aufnahmen in Verhältnisse gesetzt werden (DE 195 36 296 A1). Gerade für eine vollständige flächenhafte Erfassung einer Objektoberfläche ist dies nicht mit vertretbarem Aufwand möglich. Auch sind Markierungen als Verknüpfungspunkte für das Zusammenfügen der Teilansichten erforderlich.

In der DE 196 37 682 A1 wird ein System vorgeschla-

gen, welches diese Probleme überwindet. Dabei beleuchtet ein Projektionssystem die Szene mit einer Serie von Streifenbildern, bestehend aus zwei zueinander um 90° verdrehten Sequenzen. Solche aus zwei unterschiedlichen Positionen auf das Objekt projizierte Streifenbilder ermöglichen bei gleichzeitiger Beobachtung mit einer fest positionierten Kamera, eine Auswertung gemäß dem funktionalen Modell der Photogrammetrie. Nachteile dieses Systemkonzeptes ergeben sich vor allem bei der vollständigen Vermessung von komplexen Objekten. Mit der Komplexität des Meßobjektes steigt auch die Anzahl der notwendigen Ansichten. Es ist aber nicht sinnvoll, die Anzahl der Kameras zu erhöhen, da eine Meßinformation nur an einem Objektpunkt vorliegt, der sowohl aus zwei unterschiedlichen Richtungen beleuchtet wird, als auch von der Kamera beobachtet wird. Das Justieren des Meßsystems, d.h. das Einrichten der erforderlichen Kameras gestaltet sich darüber hinaus um so schwieriger, je mehr Ansichten eingerichtet werden müssen. Für komplexe Meßaufgaben ist ein solches vorausschauendes Einrichten des Sensorsystems nicht immer befriedigend möglich. Nachteilig bei bekannten Verfahren ist außerdem, daß das Ergebnis der Messung für eine Bewertung immer erst am Ende des kompletten Meßprozesses zur Verfügung steht. Eine Zwischenauswertung und darauf aufbauend eine angepaßte Positionierung des Projektors und der Kamera(s) ist dabei nicht möglich.

Aus der DE 100 25 741 A1 ist ein Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Koordinaten von Gegenständen und/oder deren zeitlicher Änderung bekannt, bei dem der Gegenstand jeweils aus mindestens zwei Richtungen mit einer Serie von Lichtmustern beleuchtet wird, die mit einer zweidimensional auflösenden Sensoranordnung aufgezeichnet werden und zwar zur Erfassung unter-

5
10
15
20
25
30
35
schieblicher Ansichten bei unterschiedlichen Positionen der Sensoranordnung. Dabei wird bei einer neuen Position der Sensoranordnung mindestens eine Projektionsrichtung so gewählt, daß sie mit einer Projektionsrichtung der vorhergehenden Position der Sensoranordnung übereinstimmt. Bei diesen beiden Projektionsrichtungen sind die Phasenmeßwerte identisch und daraus kann eine Verknüpfungsvorschrift zwischen den Aufzeichnungspunkten der Sensoranordnung bei der neuen und der vorhergehenden Position bestimmt werden. Dieses System ist selbsteinmessend, d.h. es müssen vor einer Messung keinerlei geometrische oder optische Systemgrößen bekannt sein oder vorher kalibriert werden. Die Kalibrierung geschieht bei diesem bekannten Verfahren während des Messens, d.h. die Kalibrierkamera ist gleichzeitig die Meßkamera. Dieses Verfahren ist beispielsweise bei komplexen Objekten nicht zufriedenstellend, da Abschattungen nicht zu vermeiden sind.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Koordinaten eines Gegenstandes zu schaffen, mit der eine Vermessung von komplexen Gegenständen ohne Markierungen oder Texturen, ohne das Auffinden von homologen Punkten und ohne daß geometrische oder optische Systemgrößen bekannt sein oder vorher kalibriert werden müssen, möglich ist, wobei die Anzahl der möglichen Aufnahmegerichtungen nicht durch die Anzahl der Kameras begrenzt ist und wobei die Meßzeit verringert werden kann.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die Merkmale des Hauptanspruchs gelöst.

Dadurch, daß die aus den mindestens zwei Richtungen

auf den Gegenstand projizierten Lichtmuster nicht nur jeweils von einer zugeordneten ersten Aufzeichnungsvorrichtung sondern zusätzlich von mindestens einer zweiten Aufzeichnungsvorrichtung punktweise als Bild erfaßt werden, wobei die mindestens eine zweite Aufzeichnungsvorrichtung ortsfest in Bezug auf den zu vermessenden Gegenstand verbleibt und nicht wie die Projektionsvorrichtung und die erste Aufzeichnungsvorrichtung versetzt wird und daß aus den mit der zweiten Aufzeichnungsvorrichtung aufgezeichneten Punkten der projizierten Lichtmuster mindestens vier Phasenmeßwerte bestimmt werden, aus denen die Parameter der Projektionsvorrichtung für alle Richtungen der Projektion bestimmt werden, ist es möglich, eine Kalibrierung des Systems in getrennter Weise zum Messen vorzunehmen. Der Gegenstand kann aus einer beliebigen Anzahl von Richtungen aufgrund der frei beweglichen Sensoranordnung, bestehend aus Projektionsvorrichtung und erster Aufzeichnungsvorrichtung erfaßt werden. Die für die Kalibrierung notwendigen Daten werden während der Meßwertaufnahme erfaßt, wobei eine Trennung zwischen stationärer Kalibrierkamera und beweglicher Meßkamera realisiert wird. Dies erhöht die Flexibilität der Meßanordnung im Sinne eines mobilen Sensors. Die Anzahl der zu digitalisierenden Objektansichten ist prinzipiell frei und nicht auf die Anzahl der verwendeten Kameras beschränkt, sondern kann größer gewählt werden. Durch die Selbstkalibrierung kann die messende Sensoranordnung während des Meßablaufs mechanischen Änderungen unterliegen, ohne daß diese das Meßergebnis beeinflussen.

Da für die Bestimmung der geometrischen Kenngrößen der Projektionsvorrichtung vier Phasenmeßwerte, für die der ersten Aufzeichnungsvorrichtung nur zwei Phasenmeßwerte und für die Berechnung der dreidimensio-

nalen Koordinaten nur ein Phasenmeßwert notwendig sind, kann die Meßzeit erheblich verkürzt werden.

5 Durch die in den Unteransprüchen angegebenen Maßnahmen sind vorteilhafte Weiterbildungen und Verbesserungen möglich.

10 Insgesamt können mit dem erfindungsgemäße Verfahren komplexe Gegenstände vermessen werden. Es werden keine objektfesten oder speziell projizierte Paßmarken oder auch besondere Objekteigenschaften für das Auf-
finden der homologen Punkte zur Bildmontage benötigt. Aufwendige Matching-Prozeduren entfallen deswegen
15 vollständig. Demgegenüber stehen über das Pixelraster der stationären Kalibrierkamera(s) freie virtuelle Marken zur Verfügung. Eine Objektinteraktion wird somit vermieden. Es können technisch sehr einfache automatische Meßsysteme aufgebaut werden. Trotzdem sind
20 diese in der Lage komplexe Objekte vollständig und flächenhaft zu erfassen. Für die Standortänderung der Sensoranordnung sind keine teuren, genauen Führungsmittel bzw. Handling-Systeme notwendig. Für die Zuordnung von Teilbereichen zum gesamten dreidimensionalen Bild ist keine Überlappung der mit der Sen-
25 soranordnung jeweils erfaßten Teilbereiche notwendig.

Die Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigen:

30 Fig. 1 eine schematische Darstellung des Meßablaufs entsprechend dem erfindungsgemäßen Verfahren,

35 Fig. 2 ein erstes Ausführungsbeispiel einer bei dem erfindungsgemäßen Verfahren verwendeten Meßvorrichtung,

Fig. 3 ein zweites Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens,

5

Fig. 4 ein drittes Ausführungsbeispiel einer Meßvorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens,

10

Fig. 5 ein viertes Ausführungsbeispiel einer Meßvorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens,

15

Fig. 6 ein fünftes Ausführungsbeispiel einer Meßvorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens, und

20

Fig. 7 ein sechstes Ausführungsbeispiel einer Meßvorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens.

Das erfindungsgemäße Verfahren wird im Folgenden unter Heranziehung der Fign. 1, 2 und 3 beschrieben. Der zu vermessende Gegenstand 1 bzw. das Objekt ist beispielsweise auf einem Meßtisch befestigt und wird von einem einen Bestandteil einer Sensoranordnung 2 bildenden Projektor 3 auf einem Stativ beleuchtet. Eine gleichfalls Bestandteil der Sensoranordnung 2 bildende Kamera 4 nimmt das Bild des beleuchteten Objektes 1 bzw. des Objektbereichs auf. Im Ausführungsbeispiel ist die als Kamera ausgebildete Aufzeichnungsvorrichtung eine CCD-Kamera auf einem Stativ.

25

30

35

In der Fig. 2 sind der Projektor 3 und die Kamera 4 voneinander unabhängig, während in Fig. 3 Projektor 3 und Kamera 4 auf einem Stativ miteinander starr ver-

bunden sind, was zu einer Vereinfachung der Meßwertaufnahme führt. Die Fign. 2 und 3 zeigen die Sensoranordnung 2 in zwei verschiedenen Positionen, wobei die Position 1 mit durchgezogenen Linien dargestellt ist und die Position 2 mit gestrichelten Linien ausgeführt ist.

Der Projektor 3 projiziert auf das zu vermessende Objekt 1 oder einen Objektbereich Lichtmuster, die als Liniengitter und/oder Gray-Code-Sequenzen ausgebildet sind. Die Kamera 4 registriert an jedem ihrer Empfängererelemente die Intensität der auf dem Objekt 1 abgebildeten Streifenbilder als Meßwerte. Anschließend wird das Gitter und/oder die Gray-Code-Sequenz um 90° gedreht und erneut auf den Gegenstand 1 projiziert, wobei die Drehachse parallel zur optischen Achse des Projektionssystems liegt.

Weiterhin ist eine sogenannte Kalibrierkamera 5 vorgesehen, die gleichfalls als CCD-Kamera ausgebildet ist und Bilder des Objekts 1 bzw. eines Objektbereichs aufnimmt. Anstelle der Kalibrierkamera können auch Photodetektoren vorgesehen sein und da nur eine begrenzte Anzahl von Meßpunkten aufgenommen werden muß, müssen als Mindestanzahl nur drei Photodetektoren verwendet werden.

In Fig. 1 sind die prinzipiellen Beziehungen beim Meßablauf dargestellt. Von der Sensorposition 1, die in den Fign. 2 und 3 mit durchgezogenen Linien gekennzeichnet ist, werden, wie oben ausgeführt, Lichtmuster mittels des Projektors 3 derart auf das Objekt 1 projiziert, daß zwei um einen Winkel (im Optimum um 90°) zueinander verdrehten Phasenfelder erhalten werden, wodurch jeder Meßpunkt auf dem Objekt 1 mit zwei Phasenwerten signalisiert wird. Der Projektor 3 pro-

jiziert beispielsweise auf das zu vermessende Objekt 1 oder einen Objektbereich eine Serie von zwei Struktursequenzen von phasenverschobenen Gitterlinien und/oder Gray-Code-Sequenzen, wobei die beiden Sequenzen die Verdrehung gegeneinander um 90° aufweisen. Ebenso wie die Meßkamera 4 nimmt die Kalibrierkamera 5 an jedem ihrer Empfängerelemente die Intensitätsmeßwerte der Einzelbilder der Sequenzen auf.

Mit bekannten Algorithmen der Streifenbilddauswertung lassen sich aus den mit der Meßkamera 4 und der Kalibrierkamera 5 aufgezeichneten Bildern Phasenmeßwerte, die den Koordinaten in der Gitterebene des Projektionssystems entsprechen, an jedem Kamerapixelpunkt sowohl für die Meßkamera 4 als auch für die Kalibrierkamera 5 berechnet, wobei durch die gewählte Art der Streifenprojektion, z.B. verdrehte Gittersequenzen an dem beobachteten Punkt des Gegenstandes 1 bis zu zwei Phasenmeßwerte pro Beleuchtungsrichtung gewonnen werden.

Im nachfolgenden Schritt wird die Sensoranordnung 2 von der Sensorposition 1 in eine beliebige andere Position versetzt, wobei diese Position 2 in Fig. 2 und Fig. 3 durch die gestrichelten Linien dargestellt ist. Dabei bleibt der Standpunkt der Kalibrierkamera 5 relativ zum Gegenstand 1 unverändert. Von dieser neuen Position der Sensoranordnung 2 werden von dem Projektor 3 weitere Struktursequenzen bzw. Gitterlinien in gleicher Weise, wie oben aufgeführt, auf das Objekt 1 bzw. den Objektbereich projiziert, wobei wiederum sowohl die Meßkamera 4 als auch die Kalibrierkamera 5 die Bildsequenzen bzw. Teile davon simultan aufnehmen.

Dieser Vorgang des Umsetzens der Sensoranordnung 2 in

weitere Positionen kann solange wiederholt werden,
bis jeder zu vermessende Bereich des Gegenstandes
mindestens einmal von der Sensoranordnung 2 erfaßt,
d.h. von dem Projektor 3 ausgeleuchtet und gleichzei-
5 tig mit der Meßkamera 4 beobachtet worden ist. Dabei
kann die Meßwertaufnahme an den verschiedenen Posi-
tionen aufeinander folgend und anschließen die not-
wendigen Berechnungen durchgeführt werden. Es können
jedoch auch Berechnungen nach jeder neuen Position
10 vorgenommen werden.

Die Sensoranordnung 2 und die Kalibrierkamera 5 sind
mit einer Auswerteeinrichtung verbunden, in der die
notwendigen mathematischen Berechnungen für die Be-
15 stimmung der dreidimensionalen Koordinaten des Gegen-
standes durchgeführt werden. Dazu ist für die Auswer-
tung der Phaseninformation erforderlich, daß die Geo-
metrieparameter des Projektionssystems bekannt sind.
Die Raumlage der einzelnen Projektorpositionen wird
20 durch sechs äußere Orientierungsparameter (drei Koor-
dinaten der Projektionszentren, drei Euler'sche Dreh-
winkel um die mitgedrehten Koordinatenachsen) festge-
legt. Zur Berechnung dieser Geometrie Größen wird mit
funktionalen Modellen der Programmetrie ein Glei-
25 chungssystem aufgestellt. Als Eingangsgrößen dienen
die vier gemessenen bzw. aus den Meßwerten berechne-
ten Phasenwerte. Auch die Raumlage der Meßkamera 4,
die gleichfalls durch Orientierungsparameter bestimmt
ist, wird über die Auswerteeinrichtung ermittelt. Da-
30 bei werden die Kenntnisse über die Projektionsvor-
richtung sowie zwei Phasenmeßwerte verwendet.

Der Auswerteprozess soll unter Heranziehung der Fig. 1
im Folgenden erläutert werden. Wie schon ausgeführt
35 wurde, ist die Grundbedingung für die Datenauswer-
tung, daß der Projektor 3 die von der stationären Ka-

librierkamera 5 eingesehenen Bereiche des Gegenstandes 1 aus mindestens zwei Positionen signalisiert. Weiterhin muß beachtet werden, daß die Intensitätsmeßwerte für alle Beleuchtungspositionen von der Kalibrierkamera 5 immer an dem gleichen Objektpunkt O_k auf der Oberfläche des Gegenstandes 1 registriert werden, d.h. es darf keine Relativbewegung zwischen Gegenstand 1 und der Kalibrierkamera 5 stattfinden. In Fig. 1 wird dieses Bedingung anhand der Strahlen 6, 7, 8 dargestellt, die alle auf den Objektpunkt O_k treffen. Die mitbewegte Meßkamera 4 hingegen erfaßt für jede Position 1 ($1 = 1 \dots n$) unterschiedliche Bereiche O_1 . Zur Vereinfachung ist in der schematischen Darstellung der Fig. 1 aus diesen Objektbereichen immer nur ein Punkt O_1 bzw. O_2 gezeichnet.

Die Auswertung des Meßvorganges zur Bestimmung der 3-D-Koordinaten der Oberfläche des Gegenstandes 1 ist ein dreistufiger Prozeß. Dabei werden prinzipiell erst alle Projektorpositionen berechnet, d.h. kalibriert, dann werden alle Meßkamerapositionen und abschließend die 3-D-Koordinaten der von den Positionen der Sensoranordnung 2 erfaßten Koordinaten des Gegenstandes berechnet. Dies geschieht, wie oben ausgeführt, nach der gesamten Meßwertaufnahme oder zwischen der Meßwertaufnahme an unterschiedlichen Positionen.

Erster Auswerteschritt:

In einem ersten Auswerteschritt werden unter Verwendung der mit der stationären Kalibrierkamera 5 an den Bildelementen (i^m_k, j^m_k) aufgenommenen Projektorbildkoordinaten $(\xi^p_{1,k}, \eta^p_{1,k})$, d.h. Phasenmeßwerten, die den Objektpunkt O_k beschreiben, die äußeren und inneren Orientierungsparameter für alle Projektorpositio-

nen 1 mittels bekannter Methoden des Bündelblockausgleichs berechnet. Grundbedingung hierfür ist, wie oben ausgeführt, daß für die stationäre Kamera mindestens vier Phasenbilder zur Verfügung stehen, die bei Projektion aus mindestens zwei unterschiedlichen Projektorpositionen 1 generiert wurden. Für jede Projektorposition werden somit die sechs äußeren Orientierungsparameter berechnet, die als Geometrieparameter der Projektoren dienen und die Raumlage der einzelnen Projektorpositionen beschreiben. Diese Berechnung kann als Kalibrierung verstanden werden. Die Kalibrierkamera als Übersichtskamera dient somit zum Registrieren der homologen Punkte bzw. ihre Pixel als "virtuelle homologe Punkte".

Bisher wurde nur von einer Kalibrierkamera 5 gesprochen. Es können jedoch eine Mehrzahl von Kalibrierkameras 5 vorgesehen sein, die in fester Beziehung zu dem Objektpunkt stehen, wobei die Anzahl der Kameras mit m ($m \geq 1$) bezeichnet ist. Diese Kalibrierkameras 5 sind in unterschiedlichen Beobachtungspositionen angeordnet und es kann somit ein größerer Objektbereich erfaßt werden, d.h. kompliziertere Gegenstände ausgemessen werden.

Zweiter Auswerteschritt:

In der Position 1 der Sensoranordnung 2 nimmt die Kamera 4 mit ihrem Raster aus Empfängererelementen den Gegenstand 1 auf, wobei hier ein Punkt O_1 aus dem Bereich herausgegriffen ist, der über die Strahlen 9 und 10 gekennzeichnet ist. An dem Pixelpunkt (ξ_1^K, η_1^K) der Kamera 4 werden zwei Meßinformationen $(\xi_{1,1}^P, \eta_{1,1}^P)$ in Form von Phasenmeßwerten gewonnen, die den Projektorbildkoordinaten in der Gitterebene entsprechen. Aus diesen Informationen und den im ersten Aus-

werteschrift berechneten Orientierungsparametern des Projektors 3 an der Position 1 werden die Orientierungsparameter der Meßkamera 4 an der Position 1 über einen freien Bündelausgleich berechnet, d.h. die Meßkamera wird bezüglich ihrer Position kalibriert. Dabei wird nicht nur ein Punkt O_1 aus dem erfaßten Objektbereich verwendet, sondern es können bis zu $(i \times j)$ Punkte verwendet werden, wobei $i \times j$ die Pixelzahl der Meßkamera 4 in Zeilen- und Spaltenrichtung ist.

Hiernach stehen die notwendigen die Sensoranordnung 2 an der Position 1 beschreibenden Orientierungsparameter zur Verfügung, wobei mit dem ersten Auswerteschritt der Projektor 3 und mit dem zweiten Auswerteschritt die Kamera 4 an dieser Position kalibriert wurden.

Dritter Auswerteschritt:

Unter Verwendung der Orientierungsparameter des Projektors 3 und der Kamera 4 an der Position 1 werden durch klassische Triangulation aus den Phasenbildern die dreidimensionalen Koordinaten des Punktes O_1 und entsprechend aller von der Kamera 4 sichtbaren Objektpunkte $(i \times j)$ in dieser Position 1 bzw. Ansicht 1 berechnet werden. Da der Objektpunkt durch zwei Gittersequenzen signalisiert wurde und somit zwei Phasenbilder zur Verfügung stehen, jedoch nur ein Phasenmeßwert notwendig ist, besteht prinzipiell die Möglichkeit, jeden Punkt zweimal zu berechnen und über eine Mittelung zu verrechnen, wodurch die Koordinatenmeßgenauigkeit erhöht wird.

Die Auswerteschritte zwei und drei werden für die Position 2 der Sensoranordnung 2 und nachfolgend schrittweise für alle folgenden Positionen durchge-

führt. Im Ergebnis wird eine 3-D-Punktewolke des Gegenstandes mit der Meßkamera 4 aus 1 Beobachtungspositionen und, wenn eine Mehrzahl von Kalibrierkameras 5 vorhanden ist, zusätzlich aus m Beobachtungspositionen gewonnen.

In den Fig. 4 bis 7 sind weitere Möglichkeiten einer Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens dargestellt. In Fig. 4 sind eine Mehrzahl von Kalibrierkameras 5 an einem Gestell 11 befestigt, unter dem das Objekt 1 angeordnet ist und das aus zwei portalartigen parallel angeordneten Trägerelementen 12 und einem die Trägerelemente 12 verbindenden Querbalken 13 besteht. An dem Querbalken 13 ist die Sensoranordnung 2 an einem in allen Raumrichtungen drehbaren Drehteil 14 befestigt, wobei auch die Kamera und/oder der Projektor 3 in ihrem Winkel zur Vertikalen verändert werden können.

In Fig. 5 ist der Gegenstand 1 auf einem Meßtisch 15 angeordnet und eine Kalibrierkamera 5 ist oberhalb des Objektes fest an einem Gestell 16 befestigt. Die Sensoranordnung 2 ist wiederum an einer Dreheinheit 17 befestigt, in deren Drehachse sich der Meßtisch 16 befindet. Die Sensoranordnung dreht sich somit in einem Winkel zur Vertikalen um den Gegenstand 1 herum.

In Fig. 6 ist der Meßtisch in Form eines Drehtisches 18 ausgebildet, der zu einer Basis 19 drehbar ist. An dem Drehtisch ist über einen Arm 20 die Kalibrierkamera 5 derart befestigt, daß sie über dem Gegenstand 1 steht. Meßkamera 4 und Projektor 3 der Sensoranordnung 2 sind an einem Balken 21 befestigt, der starr mit der Basis 19 verbunden ist.

Schließlich ist in Fig. 7 eine weitere Vorrichtung

zur Durchführung des Verfahrens dargestellt. Dabei
ist die Sensoranordnung 2 an einer um das Objekt 1
drehbaren kreisförmigen Führungsbahn 22 derart befe-
stigt, daß sie sich auf der Führungsbahn auf dem
5 Halbkreis bewegen kann und frei positionierbar ist,
wobei die Führungsbahn 22 um das Objekt 1 um einen
Winkel von bis zu 360° frei drehbar ist. An einem die
Führungsbahn umgebenden Gestell 23 sind eine Mehrzahl
von Kalibrierkameras 5 befestigt. Es kann somit so-
10 wohl die Ober- als auch die Unterseite des Gegenstan-
des 1 erfaßt werden.

Patentansprüche

- 5 1. Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Koordinaten eines Gegenstandes, bei dem der Gegenstand mit einer Projektionsvorrichtung aus mindestens zwei Richtungen mit Lichtmustern beleuchtet wird, und die projizierten Lichtmuster auf dem
10 Gegenstand mit einer zweidimensional auflösenden ersten Aufzeichnungsvorrichtung punktweise aufgezeichnet werden, wobei für die jeweiligen aufgezeichneten Punkte der Oberfläche des Gegenstandes Phasenwerte bestimmt und diese zur Berechnung von geometrischen Kenngrößen und räumlichen Koordinaten der Punkte verwendet werden,
15 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
 daß die aus den mindestens zwei Richtungen auf den Gegenstand projizierten Lichtmuster oder
20 Teile davon zusätzlich von mindestens einer zweiten Aufzeichnungsvorrichtung punktweise aufgezeichnet werden, wobei die mindestens eine zweite Aufzeichnungsanordnung ortsfest in Bezug auf den zu vermessenden Gegenstand verbleibt und
25 daß aus den mit der zweiten Aufzeichnungsvorrichtung aufgezeichneten Punkte der projizierten Lichtmuster mindestens vier Phasenmeßwerte bestimmt werden, aus denen die geometrischen Kenngrößen der Projektionsvorrichtung für die mindestens zwei Richtungen der Projektion berechnet
30 werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß nach der Bestimmung der geometrischen Kenngrößen der Projektionsvorrichtung die geome-

trischen Kenngrößen der ersten Aufzeichnungsvorrichtung unter Verwendung der geometrischen Kenngrößen der Projektionsvorrichtung bei der jeweiligen Projektionsvorrichtung und von mindestens zwei Phasenmeßwerten berechnet werden, die aus den mit der ersten Aufzeichnungsvorrichtung aufgezeichneten, aus der jeweiligen Richtung projizierten Lichtmustern bestimmt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß unter Verwendung der vorher bestimmten geometrischen Kenngrößen der Projektionsvorrichtung und der ersten Aufzeichnungsvorrichtung und mindestens einem Phasenmeßwert, der aus den mit der ersten Aufzeichnungsvorrichtung aufgezeichneten, aus der jeweiligen Richtung projizierten Lichtmustern bestimmt wird, die dreidimensionalen Koordinaten der jeweiligen Punkte des Gegenstandes berechnet werden.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß nach der Projektion der Lichtmuster aus einer ersten Richtung und Aufzeichnung der Ansicht des Gegenstandes aus einer ersten Richtung die Projektionsvorrichtung und die erste Aufzeichnungsvorrichtung für die Projektion aus einer zweiten Richtung und Aufzeichnung einer anderen Ansicht des Gegenstandes aus einer zweiten Richtung von einer ersten Position in eine zweite Position umgesetzt werden.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß zur Messung von unterschiedlichen Ansichten des Gegenstandes die Projektionsvorrichtung und die erste Aufzeichnungsvorrichtung gemeinsam in unterschiedliche Positionen umgesetzt werden.

- 5 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die geometrischen Kenngrößen der Projektionsvorrichtung und der ersten Aufzeichnungsvorrichtung Orientierungsparameter sind.
7. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß zwei Phasenmeßwerte verwendet werden und jede räumliche Koordinate zweimal berechnet wird und eine Mittelung durchgeführt wird.
- 10 8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Gegenstand aus jeder Projektionsrichtung in einem ersten Schritt mit einem Liniengitter und/oder Gray-Code-Sequenzen und in einem zweiten Schritt mit dem um 90° bezüglich der Projektionsrichtung verdrehten Liniengitter und/oder den um 90° verdrehten Gray-Code-Sequenzen beleuchtet wird.
- 15 9. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 8 mit mindestens einer Sensoranordnung, die eine Lichtmuster projizierende Projektionsvorrichtung und eine erste zweidimensional auflösende Aufzeichnungsvorrichtung zum Aufzeichnen eines mit den Lichtmustern beleuchteten Gegenstandes aufweist, mit mindestens einer zweiten Aufzeichnungsvorrichtung zum Aufzeichnen des mit den Lichtmustern beleuchteten Gegenstandes, mit einem den zu vermessenden Gegenstand aufnehmenden Meßtisch und einer Auswerteeinrichtung zur Bestimmung von Kenngrößen des Meßsystems und/oder von räumlichen Koordinaten des Gegenstandes, wobei die mindestens eine zweite Aufzeichnungsvorrichtung in Bezug auf den auf dem Meßtisch aufgenommenen Gegenstand orts-
- 20
- 25
- 30

fest ist und die Sensoranordnung und der Gegenstand relativ zueinander beweglich sind.

- 5 10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Projektionsvorrichtung und die erste Aufzeichnungsvorrichtung der Sensoranordnung fest miteinander verbunden sind.
- 10 11. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Projektionsvorrichtung und die erste Aufzeichnungsvorrichtung der Sensoranordnung unabhängig voneinander beweglich und/oder umsetzbar sind.
- 15 12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Sensoranordnung auf einer Dreheinheit angeordnet ist, in deren Mittelpunkt sich der Meßtisch befindet und die Sensoranordnung eine Drehbewegung in Bezug auf den Gegenstand durchführt.
- 20 13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Meßtisch drehbar ist und die mindestens eine zweite Aufzeichnungsvorrichtung starr mit dem drehbaren Meßtisch verbunden ist, während die Sensoranordnung ortsfest angeordnet ist.
- 25 14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Sensoranordnung an einer um den Meßtisch vorzugsweise um 360° drehbare Führungsbahn frei positionierbar befestigt ist.
- 30 15. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß eine Mehrzahl von zweiten Aufzeichnungsvorrichtungen ortsfest zu dem Meßtisch vorgesehen sind.

16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß die zweite Aufzeichnungsvorrichtung mindestens drei Photodetektoren aufweist.

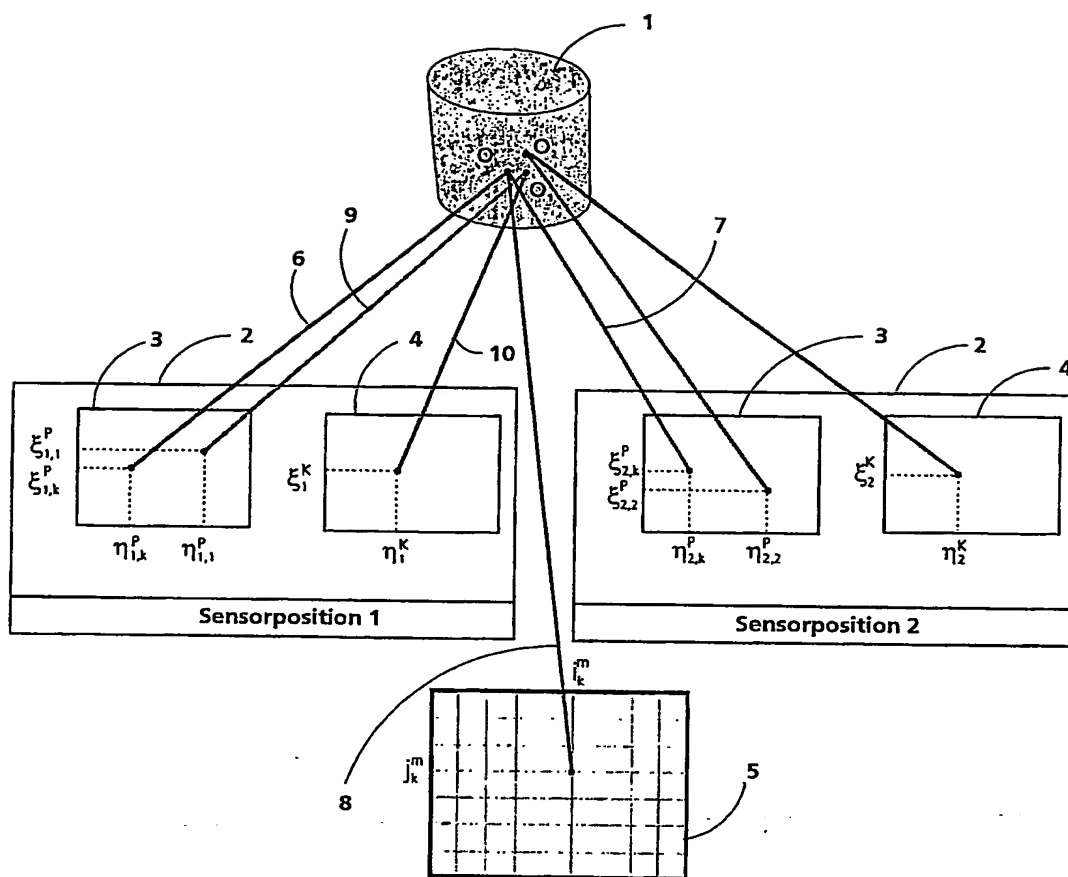


Fig.1.

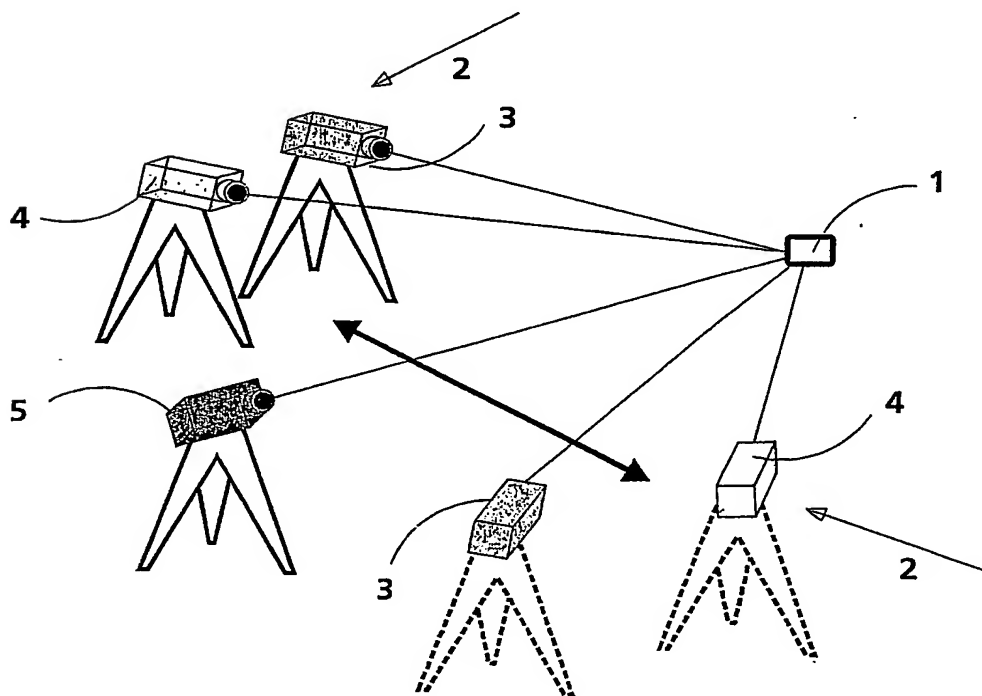


Fig.2

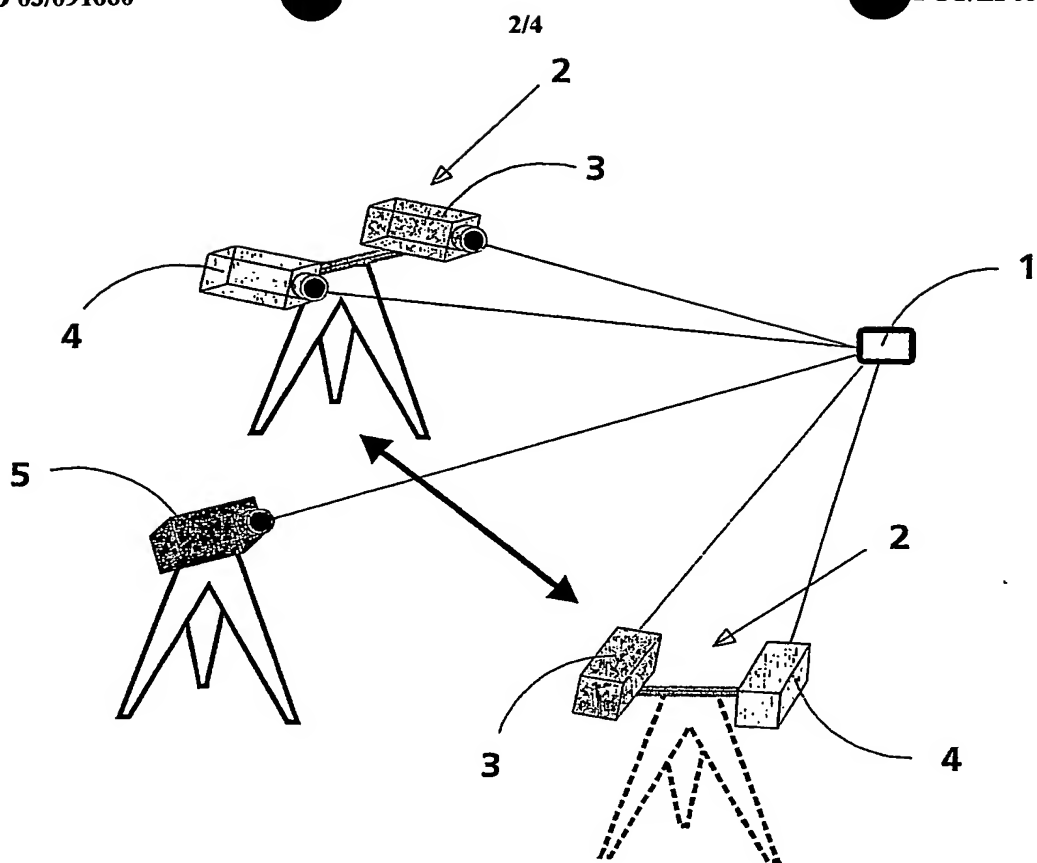


Fig.3

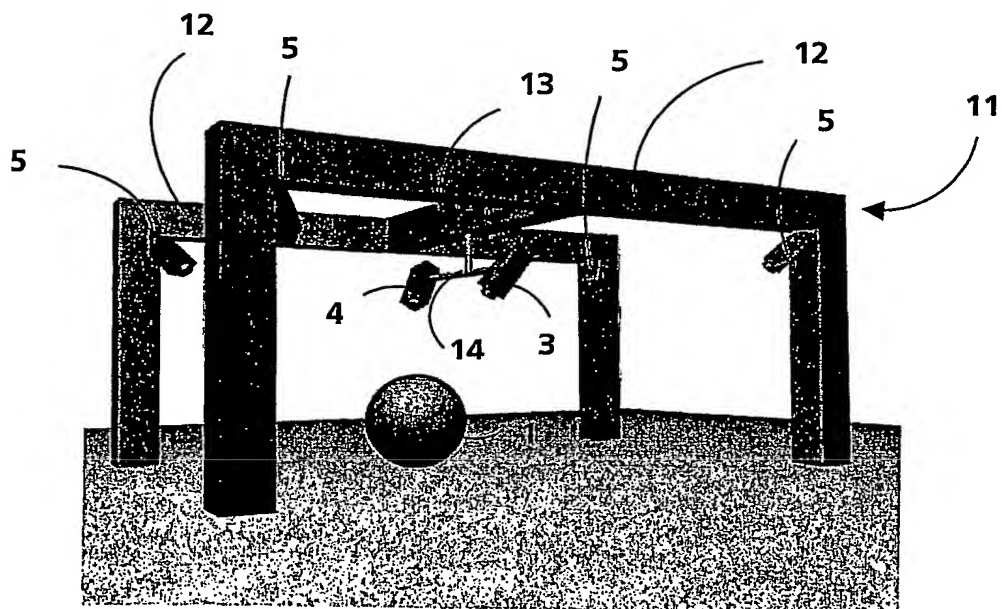


Fig.4

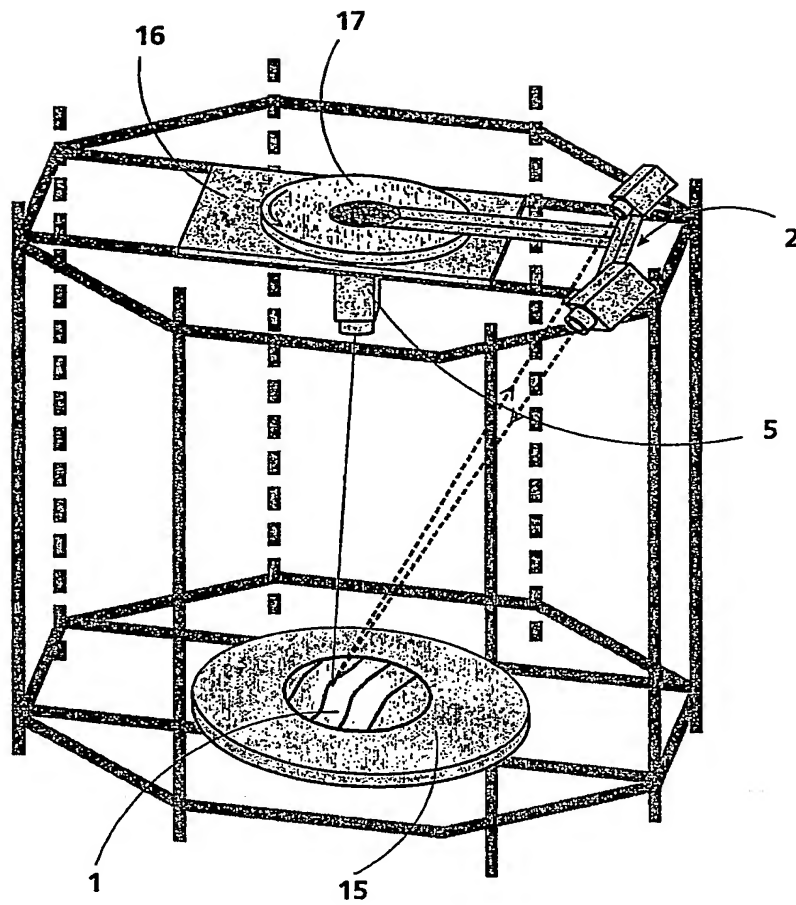


Fig. 5

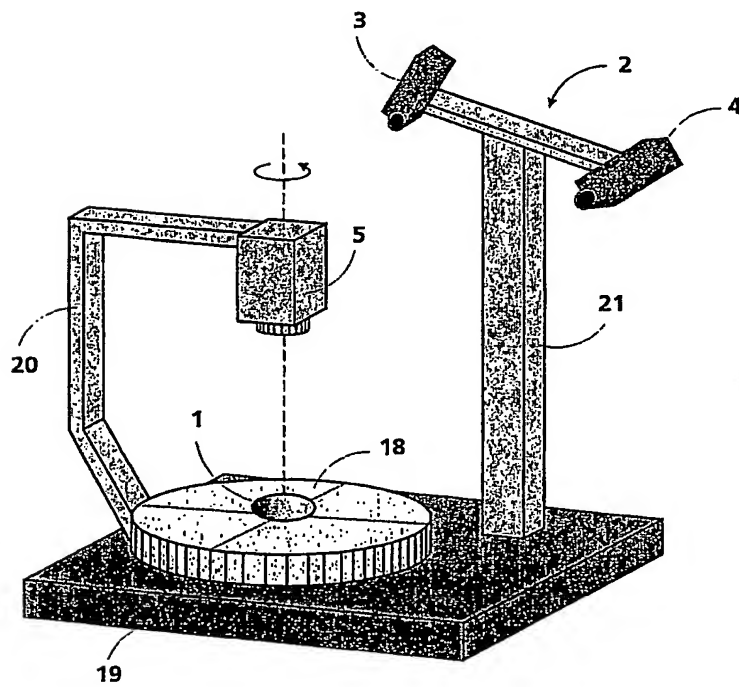


Fig. 6

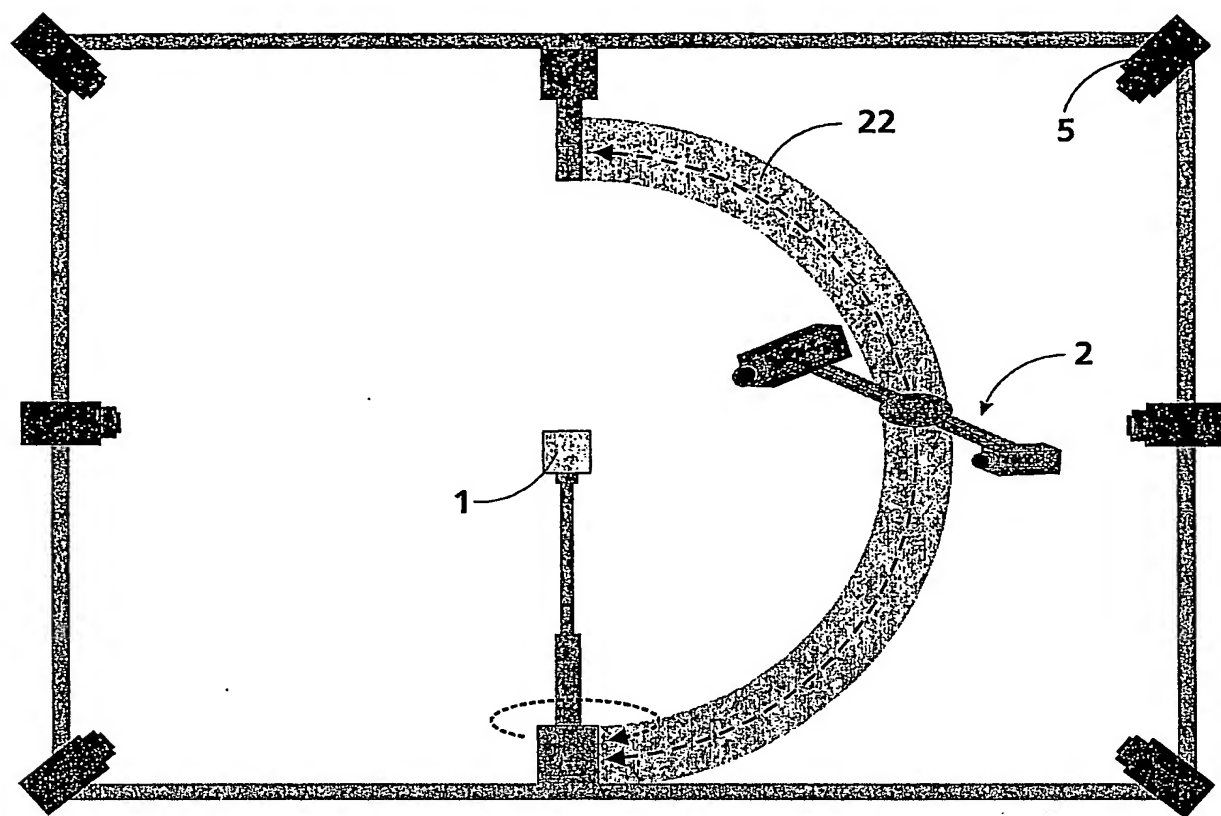


Fig.7

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 G01B11/25

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G01B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category * | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|------------|--|-----------------------|
| A | DE 100 25 741 A (FRAUNHOFER GES FORSCHUNG) 29 November 2001 (2001-11-29) cited in the application abstract ----- | 1,9 |

☐ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents:

A document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

E earlier document but published on or after the international filing date

L document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

O document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

P document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

T later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

X document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

Y document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

Z document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

31 July 2003

Date of mailing of the international search report

06/08/2003

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

De Buyzer, H

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP 04210

| Patent document cited in search report | | Publication date | Patent family member(s) | Publication date |
|---|---|---------------------|----------------------------|---------------------|
| DE 10025741 | A | 29-11-2001 | DE 10025741 A1 | 29-11-2001 |
| | | | WO 0190688 A1 | 29-11-2001 |
| | | | EP 1285226 A1 | 26-02-2003 |

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 7 G01B11/25

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RESEARCHIERTE GEBIETE

Recherchiertes Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 7 G01B

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

| Kategorie* | Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile | Betr. Anspruch Nr. |
|------------|--|--------------------|
| A | DE 100 25 741 A (FRAUNHOFER GES FORSCHUNG) 29. November 2001 (2001-11-29) in der Anmeldung erwähnt Zusammenfassung ----- | 1,9 |

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

E älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

L Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

O Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

P Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

T Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

Y Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

G Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

31. Juli 2003

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

06/08/2003

Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

De Buyzer, H

